

ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーション

呉 海元[†] 和田 俊和[†] 陳 謙[†]

本稿では、環境に固定した外部カメラで自己位置同定をしながら、床面上で移動する車両型センサレスロボットシステムのためのカメラキャリブレーション法を提案する。センサレスロボットは、単純な処理で正確な自己位置同定が行え、ロボット本体も安価であるという利点がある。しかし、センサレスロボットを正確に動作させるためには、カメラが床面との位置関係をあらかじめ求めておかなければならず、カメラの位置や方向を変えるたびにキャリブレーションをやりなおさなければならない。この煩雑さを解消するために、ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーションをシステムの初期化動作として採用する。車両型ロボットは正確な直進動作を行うことが困難であるが、ステアリング角を一定に保ち、低速で前進すれば平面上で真円を描くことができる。この軌跡は画像平面上では楕円として観測され、これを手がかりとして、本稿では、床面を基準としたカメラの視線方向および、カメラの焦点距離を求める方程式を導出する。提案手法では、ロボットの移動速度や、描かれた真円の位置と半径などの情報を利用しない。したがって、床面上にある任意の円パターンに対して、ただ1枚の観測画像があれば、カメラキャリブレーションを行うことができる。ただし、カメラ光軸回りの回転角がゼロで、焦点距離を除く内部パラメータが既知であると仮定する。求められたパラメータを用いて真上から見たときの床面の様子とロボットの軌跡が計算できる。シミュレーションによる誤差評価、4点対応から求めた Homography との比較実験、さらに実機を用いた実験により提案手法の有効性を確認した。

Robot Body Guided Camera Calibration

HAIYUAN WU,[†] TOSHIKAZU WADA[†] and QIAN CHEN[†]

This paper presents a novel camera calibration method for RC car robot control system with external cameras. This system can be regarded as a sensorless robot system, which has advantages of low-cost body and precise localization by external camera. The only drawback is that it requires a prior camera calibration. For this calibration, we don't use any specially designed object, but the robot is employed as a calibration object. Before calibration, the robot is not able to move along a straight line, however, it can move along a circle by keeping constant steering angle and slow speed. The circular locus of the robot is projected as an ellipse on the image plane by the perspective projection. Based on this geometric relationship, we propose a calibration method of the focal length and the view direction of the camera relative to the working plane of the robot. Through computer simulations and experiments with a real camera and a robot, we have confirmed that our method is more robust than the Homography based calibration using four point correspondences.

1. はじめに

我々は、移動ロボットに対して送った動作命令から予測されるロボットの行動と、外部カメラを通じて観測したロボットの実際の行動との食い違いから、衝突や滑り、ボディの遮蔽など、ロボットのボディと環境との相互作用を検出することによって、視覚だけでは得られない実環境の情報を獲得するための環境認識方式に関する研究を行っている。この研究では、環境に設置した固定カメラを外部カメラとして使用している

ため、カメラの焦点距離や、ロボットの移動する床面法線方向とカメラの視線方向がなす角などのパラメータをあらかじめ求めておかなければならない。

外部カメラの設置を変えるたびに、カメラキャリブレーションをやり直す必要がある。そのため、新しい設定でロボットに対するカメラの観測による制御ができるようになるまでに多くの手間を要する。この煩雑さを解消するため、本システムでは初期化動作として、ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーションを行う方式を採用する。具体的に、ロボットを床面上で円周を描くように動かせ、その軌跡を固定カメラで観測し、画像上に映ったロボットの軌跡からカメラの(視線)光軸と床面との間の角度とカメラの焦点距

[†] 和歌山大学

Wakayama University

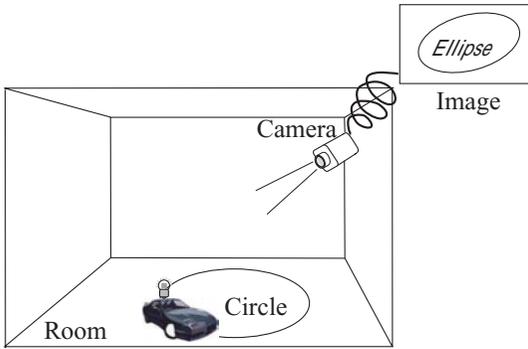


図 1 システム構成図

Fig. 1 The system construction.

離を推定する。これらのパラメータによって、カメラの位置を決定することはできないが、撮影画像を床面の真上から観測したときの画像に変換することができる。したがって、真上から見た床面上で移動するロボットの軌跡を計算することができる。

このシステムでは、環境との相互作用が起りやすいようにするため軽量の四輪駆動ラジコン車両をロボットとして用いている。この車両型ロボットは、正確な直進動作を行うことが難しいため、直線パターンに基づくカメラキャリブレーション法が利用できない。しかし、ステアリング角を一定に保ち、低速で前進させることにより地面（平面）上で真円を容易に描かせる。この軌跡は透視投影により画像平面上では楕円として観測される（図 1 参照）。本稿では、地面上にある位置と半径が未知である円周に対する 1 枚の撮影画像を用いて、カメラのキャリブレーションを行う方法について述べる。

円パターンを利用したカメラキャリブレーション方法はすでにいくつか提案されていた^{1)~5)}。Meng ら¹⁾は、3 つ以上の異なる視点から円周と円心を通る直線パターンを撮影した画像を用いた方法を提案した。Wang ら²⁾は、3 つ以上の異なる視点から直線パターンを撮影し、直線どうしの交点から同一円周上にあり、円心に対して対称性のある点のペアを発見することにより、画像間の点対応なしのカメラキャリブレーション法を提案した。Kim ら^{3),4)}、Yang ら⁵⁾は同心円パターンを利用して、複数枚の異なる視点で撮影した画像を用いたキャリブレーション法をそれぞれ提案した。

本稿では、ロール角がゼロで、焦点距離を除く内部パラメータがキャリブレーション済みであるという前提で、1 つの位置と半径が未知である円パターンに対する 1 枚の撮影画像から、円を含む面を基準としたピンホールカメラの視線方向および、カメラの焦点距離

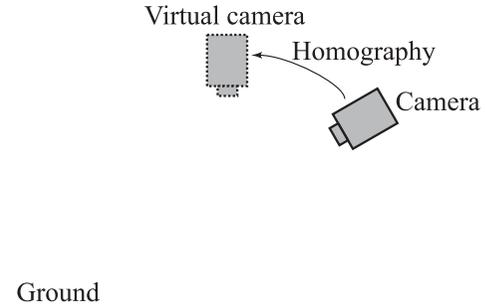


図 2 平面を観測している 2 台のカメラ間の変換

Fig. 2 Conversion between two cameras which are observing a same plane.

を求める方法を提案する。

これとほぼ同等のキャリブレーションは、Homography によって計算することができる。この場合、床面に対して垂直方向から観測している仮想カメラを想定し、斜め方向から観測しているカメラとの間で Homography 行列を計算することになる。Homography 行列を計算するには、カメラの焦点距離と、カメラ間における対応がとれた点は 4 点以上必要である。そして、この行列を分解することによって実カメラと仮想カメラとの間の平行移動と回転を求めることができるが^{8),10)}、2 つの解が得られ、どちらが正しい解であるかを判断できないという問題点がある。

それに対して、本稿で述べる手法では、カメラの光軸とロボットが移動する平面との間の角度をただ 1 つに決定することができるという利点がある。すなわち、単に異なるカメラ間で画像の変換が行えるだけでなく、スケールと平行移動の不定性は残るものの、実空間におけるカメラの姿勢と床面に対して垂直方向から観測している仮想カメラとの相対的位置関係をユニークに決定できるという特徴がある。

さらに、本手法では画像と床上のパターン（ロボットの移動軌跡）との間の点対応を利用せず、画像上の楕円（透視変換された軌跡）の形状のみから、光軸が床面と垂直である仮想カメラへの Homography 変換行列を求めることができる（図 2 参照）。CG で合成した画像を用いたシミュレーションによる誤差評価、4 点対応から求めた Homography との比較実験、さらに実機を用いた実験により提案手法の有効性を確認した。

2. 半径と中心が未知である真円を用いたカメラキャリブレーション

本稿では、ピンホールカメラモデルを想定する。世界座標系 (O_w-XYZ) とカメラ座標系 ($O_c-X'Y'Z'$)

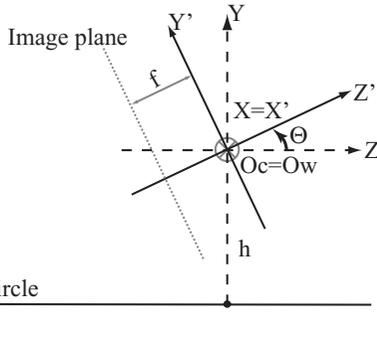


図 3 世界座標系とカメラ座標系

Fig. 3 The world coordinates and camera coordinates.

の原点位置 O_w と O_c , X 軸と X' 軸を一致しているとする。カメラの光軸を Z' 軸とし、世界座標系の Z 軸とのなす角を θ と仮定する (図 3 参照)。また、カメラ光軸回りの回転角がゼロとし、焦点距離を除く内部パラメータが既知であると仮定する。さらに、カメラの焦点距離を f とし、座標原点から床面までの距離を h とする。本稿では、ロボットの移動速度、描いた真円の半径 r と中心 (x_c, y_c, z_c) が未知であり、それらの情報がカメラキャリブレーションに利用されない。

2.1 基本原理

透視投影によりある平面内の真円が画像平面上では楕円として観測され、その楕円の方程式は下記の式に表される。

$$I_x^2 + BI_xI_y + CI_y^2 + DI_x + EI_y + F = 0 \quad (1)$$

楕円方程式のパラメータ (B, C, D, E, F) とカメラのパラメータ (f, θ) , そして真円のパラメータとの関係は次の連立方程式で表すことができる (付録 A.1 参照)。

$$\begin{cases} B = 2x'_c \cos \theta \\ C = (\sin \theta - z'_c \cos \theta)^2 + (x_c'^2 - r'^2) \cos^2 \theta \\ D = -2fx'_c \sin \theta \\ E = 2f[z'_c(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \\ \quad + (1 - z_c'^2 - x_c'^2 + r'^2) \sin \theta \cos \theta] \\ F = f^2[(z'_c \sin \theta + \cos \theta)^2 \\ \quad + (x_c'^2 - r'^2) \sin^2 \theta] \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $x'_c = x_c/h$, $z'_c = z_c/h$, $r' = r/h$ である。

画像から楕円のパラメータ (B, C, D, E, F) を求めることができるので、既知とする。連立方程式 (2) の右側に未知数 $(f, \theta, x'_c, z'_c, r')$ が 5 個あるので、解が存在する。しかし、非線形の高次方程式なので、直接に解くことが難しい。一方、床面上にある円の中心位置 (x'_c, z'_c) と半径 r' が 3 つの独立な未知パラメータであるが、1 つの円に対して、 $x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2$ の値

は一定である。そこで、 $x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2$ を 1 つの未知パラメータとして連立方程式 (2) を解くと、楕円方程式の係数より、カメラの焦点距離 f とチルトの角度 θ を次式で計算できる (付録 A.2 参照)。

$$\begin{cases} f = \frac{1}{|B|} \sqrt{B^2F - BDE + (C-1)D^2} \\ \tan \theta = -\frac{1}{f} \cdot \frac{D}{B} \end{cases} \quad (3)$$

2.2 画像から楕円方程式の獲得

提案手法では、入力画像から抽出された楕円パターンの点列を表現する楕円方程式 (1) を推定することが必要である。座標既知の点列 $\{P_i : i = 1, \dots, N\}$ に楕円をフィットさせる問題は、ある点 P_j と楕円との間の「距離」が関数 $G(P_j, A, B, C, D, E, F)$ によって定義されたとき、下記のフィット誤差 E を最小化する問題に帰着する。

$$E = \sum_{i=1}^N G(P_i, A, B, C, D, E, F) \quad (4)$$

ここで、 (A, B, C, D, E, F) は楕円方程式の係数パラメータである。点列 $\{P_i : i = 1, \dots, N\}$ に楕円をフィットさせる問題はすでに研究され、数種類の解法が提案されている^{(11), (12)}。異なる解法の精度や安定性などの差は、「距離」を定義する関数 G によって決められる。

本稿では、現段階で簡便のために、点 P_j と楕円との間の距離 G を次のように定義する。

$$G(P_j, A, B, C, D, E, F) = (AI_{xj}^2 + BI_{xj}I_{yj} + CI_{yj}^2 + DI_{xj} + EI_{yj} + F)^2 \quad (5)$$

この場合、フィット誤差 E は次のようになる。

$$E = \sum_{i=1}^N (AI_{xi}^2 + BI_{xi}I_{yi} + CI_{yi}^2 + DI_{xi} + EI_{yi} + F)^2 \quad (6)$$

ただし、有意義な解 (A, B, C, D, E, F) がすべて 0 以外の解) を得るために、 $A^2 + B^2 + C^2 + D^2 + E^2 + F^2 = 1$ という条件のもとで E の最小化を行う。

E の計算式を下記に書きなおすことができる。

$$E = V^T S V + \lambda V^T V - \lambda \quad (7)$$

ここで、

$$V = \begin{bmatrix} A & B & C & D & E & F \end{bmatrix}^T$$

$$S = \sum_{i=1}^n X_i X_i^T$$

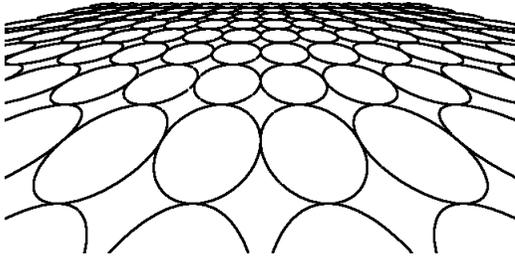


図 4 CG で合成した楕円の例

Fig. 4 The example of ellipses synthesized by CG
($f = 200(\text{pixel})$, $\theta = 30(\text{degree})$, $R = 1.0(\text{m})$).

ただし,

$$X_i = \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i y_i & y_i^2 & x_i & y_i & 1 \end{bmatrix}^T$$

G を最小にするために,

$$SV + \lambda V = 0$$

を解けばよい. この問題は, S の固有値 ($-\lambda$) と固有ベクトル (V) を求める問題に帰着する.

3. 数値実験

提案手法の有効性と精度を評価するために, CG で円パターンの撮影画像を合成し, それらを用いて実験を行った. 合成画像の例を図 4 に示す. 図 4 から円の中心はかならずしも楕円の中心に対応していないことが分かる.

数値実験では, イメージセンサのサイズを 0.3×0.4 インチとし, 画像の解像度は 640×480 画素としたので, 1 画素あたりの長さは $0.15875(\text{mm})$ である. また, レンズ中心と地面との間の距離は 3 メートルである.

3.1 円心位置変化の場合

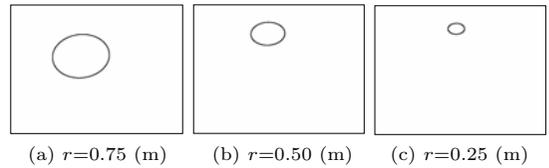
焦点距離 $f = 550$ 画素, チルト角 $\theta = 55$ 度の場合, $r = 0.75$, $r = 0.50$, $r = 0.25$ メートル, 円どうしが重ならないように円心位置を変化させて, 透視投影の画像をそれぞれ合成した. 合成画像上の楕円のパラメータを推定し, それを用いて提案手法よりカメラのパラメータを推定した.

$r = 0.75$ メートルの場合, 合成された 8 枚の楕円画像を用いたテスト結果は, 表 1 の焦点距離 f_1 とチルト角 θ_1 にまとめている. 誤差が最大となる合成楕円画像を図 5 (a) に示す. この場合, 画像上の楕円のサイズは 211×162 画素であった. $r = 0.50$ メートルの場合, 合成された 28 枚の楕円画像を用いたテスト結果は, 表 1 の f_2 と θ_2 に, $r = 0.25$ メートルの場合, 合成された 72 枚の楕円画像を用いたテスト結果は, 表 1 の f_3 と θ_3 に, それぞれまとめている. 誤差

表 1 半径と円心位置を変化した結果

Table 1 Experimental results using circles with different radius and center.

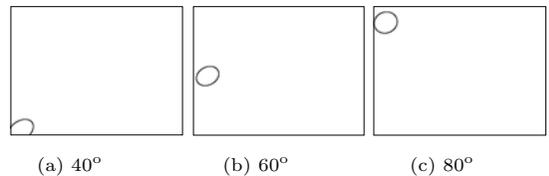
	maximum error	RMS error
$f_1(\%)$	3.1	0.7
$\theta_1(\text{degree})$	0.21	0.066
$f_2(\%)$	4.0	0.7
$\theta_2(\text{degree})$	0.38	0.055
$f_3(\%)$	24.7	2.0
$\theta_3(\text{degree})$	2.29	0.30



(a) $r=0.75$ (m) (b) $r=0.50$ (m) (c) $r=0.25$ (m)

図 5 誤差が最大となった合成楕円画像

Fig. 5 Synthetic ellipse images which the error was maximum.



(a) 40° (b) 60° (c) 80°

図 6 チルト角変化の合成楕円画像

Fig. 6 Synthetic ellipse images of changing the tilt.

が最大となった合成楕円画像をそれぞれ図 5 (b), (c) に示す. 画像上の楕円のサイズはそれぞれ 127×84 , 90×42 画素であった.

上記のうち, 誤差が大きくなる要因としては次の 2 つが考えられる. 1 つは, 楕円のサイズが小さいため, 量子化誤差の影響が顕著に表れ, フィッティング時の誤差が大きくなるからである. もう 1 つは, B の推定値が小さい (図 5 (c) に示す楕円の方程式における B の推定値は 0.03 であった) ため, 式 (3) の計算誤差が大きくなるからである.

3.2 チルト角変化の場合

焦点距離 $f = 550$ 画素, $r = 0.50$ メートルの場合, チルト角を 20 度から 60 度まで 10 度ずつ変化させて合成した楕円画像を用いたテスト結果において, 焦点距離 f の RMS 誤差が 1.2% 程度で, チルト角 θ の RMS 誤差が 0.06 度程度であった. また, $r = 0.25$ メートルの場合, チルト角を 40 度から 80 度まで 10 度ずつ変化させて合成した楕円画像 (図 6) を用いたテスト結果において, 焦点距離 f の RMS 誤差が 1.3% 程度で, チルト角 θ の RMS 誤差が 0.15 度程度

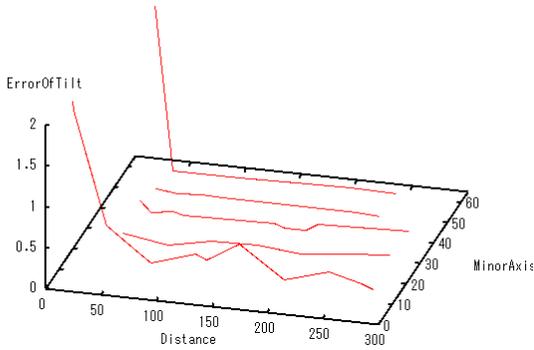


図 7 楕円の短軸の長さ、中心から画像座標系の y 軸までの距離、チルト角の推定誤差の関係

Fig. 7 The relation between minor axis, distance and error of tilt.

表 2 カメラ光軸回りの回転による推定誤差の評価

Table 2 The estimation error of θ about Roll.

Roll angle (degree)	0	1	2	3
RMS error of θ (degree)	0.055	0.274	0.446	0.613

であった．本手法の推定精度はチルト角に依存しないことが分かった．

3.3 楕円の位置と大きさによる推定誤差の評価

焦点距離 $f = 1000$ 画素，チルト角 $\theta = 40$ 度とし， $r = 0.5$ から $r = 0.1$ まで 0.1 メートル刻みで，透視投影の楕円画像をそれぞれ合成し，提案手法よりカメラのパラメータを推定した．楕円の短軸の長さ（奥行軸：MinorAxis(画素)），中心から画像座標系の y 軸までの距離（横軸：Distance(画素)），チルト角の推定誤差（縦軸：ErrorOfTilt(度)）の関係を図 7 にまとめて示す．

以上の数値実験結果から，楕円の中心が画像座標系の y 軸に極端に近くなければ，楕円のサイズが大きいほど，提案手法の精度が高い傾向があることが分かった．そして，楕円方程式の B の推定値を一定以上のものを選択して利用すれば，提案手法はカメラキャリブレーションの精度を十分保証できることが分かった．

3.4 カメラ光軸回りの回転による推定誤差の評価

焦点距離 $f = 550$ 画素，チルト角 $\theta = 55$ 度， $r = 0.5$ メートルとし，カメラ光軸回りの回転角 $\beta = 0$ 度から 3 度まで 1 度刻み，透視投影の楕円画像をそれぞれ合成した．短軸の長さが 40 画素以上の合成画像を用いて提案手法よりカメラのパラメータを推定した．カメラ光軸回りの回転角度とチルト角の推定誤差の関係を表 2 にまとめる．

3.5 Homography 法との比較

焦点距離 $f = 220$ 画素，チルト角 $\theta = 38$ 度とし，

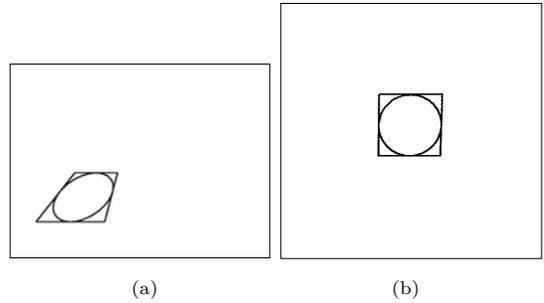


図 8 (a) 提案手法と Homography 法の比較用画像，(b) 真上から見た (a) の変換画像

Fig. 8 (a) An image for comparison of our method and Homography method, and (b) synthesized vertical view from a virtual camera.

1 辺の長さが 2.0 メートルの正方形とそれに内接した円の透視投影像を合成した（図 8 (a) 参照）．床面に対して垂直方向から見たその正方形の画像も合成した．

合成された 2 枚の画像内の正方形の 4 頂点を用いて，それらの点对応から Homography 行列を求めた．Homography 行列を分解することによって 2 通りの結果 ($\theta_1 = 37.88$ 度， $\theta_2 = 38.18$ 度) が得られた．真値に近い解を正解として選ぶと，チルト角は $\theta = 37.88$ 度で，推定誤差は 0.12 度であった．しかし，これだけの情報からカメラの焦点距離は推定できない．

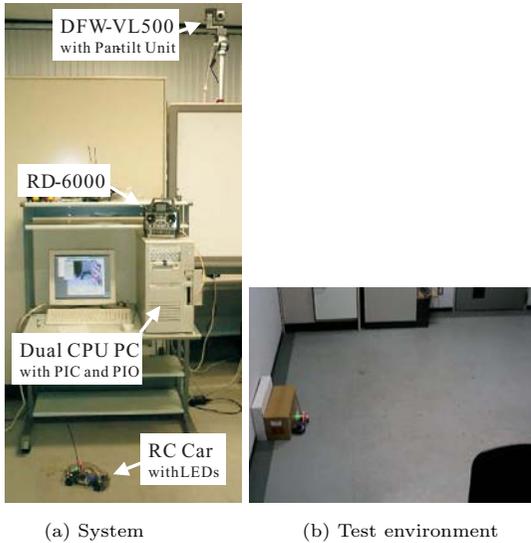
一方，内接した円の透視投影像を用いて推定されたチルト角は $\theta = 37.99$ 度で，推定誤差は 0.01 度であった．推定された焦点距離は $f = 206$ 画素であった．

さらに，提案手法より推定された f と θ を用いて，真上から見たときの図 8 (a) の様子を計算した．その結果を図 8 (b) に示す．中の矩形の 4 辺の長さは上辺 = 120 画素，その他の 3 辺 = 119 画素である．その矩形の左下のなす角 = 89.04 度，右下のなす角 = 91.44 度である．

以上の結果より，提案手法は 4 点对応に基づく Homography 以上の推定精度が得られ，真上から観測したときの画像を精度良く計算できることが分かった．

4. 実データによる実験

現在，提案手法はロボットコントロールシステムの初期化動作としてインプリメントされている．システムの構成を図 9 (a) に示す．赤と緑の 2 色 LED を設置した手作りの四輪ラジコンの車をロボットのボディとし，IEEE1394 カメラ (SONY DFW-VL500) を外部カメラとして利用している．コントロールパネル上のボタンを押すだけで，自動的にキャリブレーションを行うことができる．具体的に，床面上に置かれた口



(a) System (b) Test environment

図 9 システム構成とテスト風景

Fig. 9 Our system configuration and experiment scenery.

ボットをぎりぎり動かせるスピードを捜し出し、ステアリング角を一定に保ちながら前進させると、ロボットの移動軌跡は床面上で真円になる。そのままずっと前進させると同じ円形パターンを繰り返して描ける。提案した色検出法¹³⁾を利用して、外部カメラから観測された動画像からラジコンの車上の赤色あるいは緑色の LED を検出・追跡できる。処理時間を考慮してロボットのボディは円に沿って一周したと判断された時点で、その画像系列から得られたロボットの軌跡の点列を使って、楕円のパラメータを求め、カメラのパラメータを推定する。その後、ロボットのコントロールが可能になる。図 9 (b) に外部カメラから見たあるテスト風景の画像を示す。

4.1 円らしさによる精度評価

30 組 (7 種類のチルト角度と 22 種類の焦点距離の組合せ) の実データ点列を用いてカメラの焦点距離 f とチルト角 θ の値を推定した。推定値の精度を評価するために、推定された f と θ を用いて、真のカメラより観測された画像から真上の仮想カメラより観測された画像への変換 Homography 行列を求めた。求められた行列を用いて、実データ点列を仮想画像への変換を行った。変換後の仮想データ点列の円らしさを評価するため、仮想データ点列を用いて楕円のパラメータ (短軸の a と長軸の b) を求めた。短軸と長軸の比は最小値 $a/b = 0.995$ 、最大値 $a/b = 1.00$ で、平均値 $a/b = 0.998$ であった。画像系列から得られたロボットの移動軌跡、と変換された仮想データ点列の一例をそれぞれ図 10 (a), (b) に示す。図 10 (b) の楕円

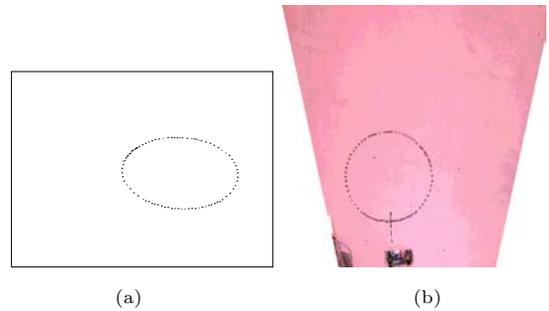


図 10 画像系列から得られたロボットの移動軌跡の例と変換された仮想データ点列

Fig. 10 (a) Observed locus of a robot, (b) Synthesized vertical view of the locus.

の短軸と長軸の比は $a/b = 0.998$ であった。これによって、床面に対して垂直方向から観測している仮想カメラから見た点列は円に十分近く、提案手法の復元精度が十分高いことを確認できた。

5. まとめ

本稿では、環境に固定した外部カメラで自己位置同定をしながら床面上で移動する車両型センサレスロボットシステムのためのカメラキャリブレーション法を提案した。車両型ロボットが床面上に描いた真円と、外部カメラから観測された楕円像との幾何学関係に基づいて、床面を基準としたカメラの視線方向および、カメラの焦点距離を求めるアルゴリズムを導出した。数値実験から、楕円方程式の B の推定値を一定以上のもので選択して利用すれば、提案手法は十分な精度が保証できることと、Homography 法以上の精度が得られることが分かった。シミュレーションと実環境に適用して得られた実験結果から提案手法の実用的有効性も確認した。

提案手法には、以下のメリットがある。

- 幾何学的あるいは光学的特性が既知である道具が不要なので、道具の保管・運送上の手間を省くことが可能になる。
- 単一の円の透視投影像が 1 枚あれば、簡単な計算でカメラのパラメータを曖昧さなく求めることができる。また、2 次元平面上の点と画像上の点の対応付けが不要なので、カメラキャリブレーションの自動化に利用することが可能である。

一方、提案したアルゴリズムにはカメラ光軸回りの回転がないという制約がある。しかし、カメラ光軸回りの回転角度は割合に簡単な方法 (たとえば、レベルメータ) で計測することが可能なので、提案手法はカメラを移動する可能性があるシステムに幅広く利用さ

れることが期待できる。現在, 1つの平面内の2つの任意の円パターンを利用した完全なカメラ外部パラメータのキャリブレーション法について検討している。

今後, 画像中心の自動推定, radial distortionの補正, などについても検討を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は科学研究費基盤(A)(2)12308016の支援を受けている。

参 考 文 献

- 1) Meng, X. and Hu, Z.: A New Easy Camera Calibration Technique Based on Circular Points, *Pattern Recognition*, Vol.36, pp.1155–1164 (2003).
- 2) Wang, G., Wu, F. and Hu, Z.: Novel Approach to Circular Points Based Camera Calibration.
- 3) Kim, J.S., Kim, H.W. and Kweon, I.S.: A Camera Calibration Method using Concentric Circles for Vision Applications, *Proc. Asian Conf. on Computer Vision*, pp.23–25 (2002).
- 4) Kim, J.S. and Kweon, I.S.: Camera Calibration using Projective Invariance of Concentric Circles, *Proc. Workshop on Image Processing and Image Understanding* (in Korean) (2001).
- 5) Yang, C., Sun, F. and Hu, Z.: Planar Conic Based Camera Calibration, *Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition* (2000).
- 6) Long, Q.: Conic Reconstruction and Correspondence From Two Views, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.18, No.2, pp.151–160 (1996).
- 7) Sukthankar, R., Stockton, R. and Mullin, M.: Smarter Presentations: Exploiting Homography in Camera-Projector Systems, *Proc. Int. Conf. on Computer Vision*, pp.247–253 (2001).
- 8) Holt, R.J. and Netravali, A.N.: Camera Calibration Problem: Some New Result, *CVIU*, No.54, Vol.3, pp.368–383 (1991).
- 9) Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.22, No.11, pp.1330–1334 (2000).
- 10) Sturm, P. and Maybank, S.: On Plane-Based Camera Calibration: A General Algorithm, Singularities, Applications, *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.432–437 (1999).
- 11) Fitzgibbon, A., Pilu, M. and Fisher R.B.: Direct Least Square Fitting of Ellipses, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.21, No.5, pp.476–480 (1999).
- 12) Halir, R. and Flusser, J.: Numerically Stable Direct Least Squares Fitting of Ellipses, WSCG (1998).
- 13) 和田俊和: 最近傍識別器を用いた色ターゲット検出—「らしさ」に基づかない識別とコンピュータビジョンへの応用, 情報処理研究会報告, 2002-CVIM-134, pp.17–24 (2002).

付 録

A.1 半径と中心が未知である真円と透視投影像の楕円との関係

本稿では, カメラが X 軸回り (図3参照) のみに回転することを仮定しているので,

$$\begin{cases} x' = x \\ y' = y \cos \theta - z \sin \theta \\ z' = y \sin \theta + z \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

という関係が成り立つ。平面上の円の方方程式は次式で表される。

$$\begin{cases} x = x_c + r \cos t \\ y = -h \\ z = z_c + r \sin t \end{cases} \quad (9)$$

ただし, t は角度のパラメータである。3次元空間中の点 (x, y, z) と透視投影像上の対応点 (I_x, I_y) の関係は次式で表される。

$$\begin{cases} I_x = f \cdot \frac{x}{-y \sin \theta - z \cos \theta} \\ I_y = f \cdot \frac{y \cos \theta - z \sin \theta}{-y \sin \theta - z \cos \theta} \end{cases} \quad (10)$$

さらに, 式(9)を式(10)に代入すると,

$$I_x = f \cdot \frac{x_c + r \cos t}{h \sin \theta - z_c \cos \theta - r \cos \theta \sin t} \quad (11)$$

$$I_y = f \cdot \frac{-h \cos \theta - z_c \sin \theta - r \sin \theta \sin t}{h \sin \theta - z_c \cos \theta - r \cos \theta \sin t} \quad (12)$$

が得られる。式(11)と(12)を整理すると

$$\sin t = \frac{(I_y h + f z_c) \sin \theta + (f h - I_y z_c) \cos \theta}{I_y r \cos \theta - f r \sin \theta} \quad (13)$$

と

$$\cos t = \frac{-I_x h + f x_c \sin \theta - I_y x_c \cos \theta}{I_y r \cos \theta - f r \sin \theta} \quad (14)$$

が得られる。 $\sin^2 t + \cos^2 t = 1$ なので

$$\begin{aligned} & [(I_y h + f z_c) \sin \theta + (f h - I_y z_c) \cos \theta]^2 \\ & + [-I_x h + f x_c \sin \theta - I_y x_c \cos \theta]^2 \\ & = [I_y r \cos \theta - f r \sin \theta]^2 \end{aligned}$$

の関係が成り立つ。これを楕円の一般方程式

$$A'I_x^2 + B'I_x I_y + C'I_y^2 + D'I_x + E'I_y + F' = 0 \quad (15)$$

の形で整理すると、

$$\begin{cases} A' = h^2 \\ B' = 2hx_c \cos \theta \\ C' = (h \sin \theta - z_c \cos \theta)^2 + (x_c^2 - r^2) \cos^2 \theta \\ D' = -2fhx_c \sin \theta \\ E' = 2f[hz_c(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \\ \quad + (h^2 - z_c^2 - x_c^2 + r^2) \sin \theta \cos \theta] \\ F' = f^2[(z_c \sin \theta + h \cos \theta)^2 \\ \quad + (x_c^2 - r^2) \sin^2 \theta] \end{cases}$$

となる。しかし、式 (15) を定数倍にしても同じ楕円を表すので、

$$I_x^2 + BI_x I_y + CI_y^2 + DI_x + EI_y + F = 0$$

という形式に正規化すると、各係数は下記のようになる。

$$\begin{cases} B = 2x'_c \cos \theta \\ C = (\sin \theta - z'_c \cos \theta)^2 + (x_c'^2 - r'^2) \cos^2 \theta \\ D = -2fx'_c \sin \theta \\ E = 2f[z'_c(\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) \\ \quad + (1 - z_c'^2 - x_c'^2 + r'^2) \sin \theta \cos \theta] \\ F = f^2[(z'_c \sin \theta + \cos \theta)^2 \\ \quad + (x_c'^2 - r'^2) \sin^2 \theta] \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 $x'_c = x_c/h$ 、 $z'_c = z_c/h$ 、 $r' = r/h$ である。

A.2 楕円方程式の係数とカメラパラメータの関係

A.1 の連立方程式 (16) の係数の比 D/B より、次のようなカメラの焦点距離 f とチルト角 θ の関係式を得ることができる。

$$f \cdot \tan \theta = -\frac{D}{B} \quad (17)$$

床面上にある円の中心位置 (x_c, z_c) と半径 r が未知パラメータであるが、1つの円に対して、 $x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2$ の値は一定である。以下では、 $x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2$ を1つの未知パラメータとし、それを消すことにより、連立方程式 (16) の係数から焦点距離 f を計算することができる。

$C \times f^2 + F$ より、

$$x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2 = \frac{f^2(C-1) + F}{f^2} \quad (18)$$

$\frac{E}{f}$ より、

$$\frac{E}{f} = -(x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) \sin 2\theta \\ + \sin 2\theta - 2z'_c \cos 2\theta \quad (19)$$

C より、

$$C = (x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \\ + \frac{1 - \cos 2\theta}{2} - z'_c \sin 2\theta \quad (20)$$

の関係式が導出できる。式 (19) と (20) より、次の連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} -\sin 2\theta \cdot (x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) - 2 \cos 2\theta \cdot z'_c \\ \quad = \frac{E}{f} - \sin 2\theta \\ \frac{1 + \cos 2\theta}{2} \cdot (x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2) - \sin 2\theta \cdot z'_c \\ \quad = C - \frac{1 - \cos 2\theta}{2} \end{cases} \quad (21)$$

これを解くと

$$x_c'^2 + z_c'^2 - r'^2 = (1-C) \tan^2 \theta - \frac{E}{f} \tan \theta + C \quad (22)$$

となり、式 (18) から式 (22) を引くことにより

$$\frac{f^2(C-1) + F}{f^2} = (1-C) \tan^2 \theta - \frac{E}{f} \tan \theta + C$$

が得られる。この式を整理すると、

$$(1-C)(f \cdot \tan \theta)^2 - E(f \cdot \tan \theta) = F - f^2 \quad (23)$$

となり、式 (17) を式 (23) に代入すれば、

$$f^2 = F - E \cdot \frac{D}{B} + (C-1) \frac{D^2}{B^2}$$

f はカメラの焦点距離なので、正の解しか物理的な意味を持たない。したがって、次の解を採用する。

$$f = \frac{1}{|B|} \sqrt{B^2 F - BDE + (C-1)D^2} \quad (24)$$

以上により、楕円方程式の係数とカメラパラメータの関係は次式で表せることが分かる。

$$\begin{cases} f = \frac{1}{|B|} \sqrt{B^2 F - BDE + (C-1)D^2} \\ \tan \theta = -\frac{1}{f} \cdot \frac{D}{B} \end{cases} \quad (25)$$

(平成 15 年 3 月 20 日受付)

(平成 15 年 9 月 9 日採録)

(担当編集委員 斎藤 英雄)



呉 海元 (正会員)

昭和 37 年生。昭和 62 年中国西安交通大学大学院修士課程修了。同年より同大学助手。平成 2 年より同大学講師。平成 6 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理専攻修士後期課程に入学。平成 8 年同中退。同年より京都工芸繊維大学工芸学部助手。平成 14 年より和歌山大学システム工学部助教授。工学博士。電子情報通信学会，システム制御情報学会，ヒューマンインターフェース学会各会員。



陳 謙 (正会員)

昭和 37 年生。昭和 63 年大阪大学大学院修士課程修了。平成 4 年同大学院博士後期課程修了。同年(財)イメージ情報科学研究所入所。平成 6 年より大阪大学基礎工学部助手。平成 7 年より奈良先端科学技術大学院大学情報学部助手。平成 9 年より和歌山大学システム工学部講師。平成 11 年より同大学助教授。工学博士。ロボット学会会員。



和田 俊和 (正会員)

昭和 35 年生。昭和 62 年東京工業大学大学院修士課程修了。平成 2 年同大学院博士課程修了。同年より岡山大学工学部助手。平成 6 年より同大学大学院自然科学研究科助手。平成 6 年より同大学工学部講師。平成 9 年より京都大学大学院情報学研究科助教授。平成 14 年より和歌山大学システム工学部教授。工学博士。平成 7 年第 5 回 David Marr 賞受賞。電子情報通信学会，IEEE 各会員。
